



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**TECHNOLOGIE NAPÁJECÍCH ČERPADEL DO  
100 KG/H VODY**

TECHNOLOGIES OF FEEDPUMP WATER TO 100 KG/HOUR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Josef Holčapek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Josef Holčapek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Technologie napájecích čerpadel do 100 kg/h vody

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z hlavních problémů uplatnění malých pístových parních motorů v mikrokogeneračních jednotkách je napájecí čerpadlo. Na studentovi tedy bude shrnout a posoudit možnosti nabízených čerpadel v rozmezí zadaných parametrů.

### Cíle bakalářské práce:

- (1) Požadavky na napájecí čerpadla v malých energetických blocích.
- (2) Typy napájecích čerpadel a jejich vlastnosti.
- (3) Návrh zapojení vybraného čerpadla v okruhu s pístovým parním motorem o výkonu 2 kW.

### Seznam doporučené literatury:

NECHLEBA, Miroslav, HUŠEK, Josef. Hydraulické stroje, 1966. Vydání první. Praha Státní nakladatelství technické literatury.

MELICHAR, Jan, BLÁHA, Jaroslav, BRADA, Karel. Hydraulické stroje-Konstrukce a provoz, 2002. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, ISBN 80 – 01 – 02657 – 4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem práce je provést rešerši z oblasti čerpací techniky, určit požadavky na napájecí čerpadla pro malé energetické bloky, určit typy napájecích čerpadel a jejich vlastnosti. Dále je úkolem navrhnout zapojení vybraného napájecího čerpadla v okruhu s pístovým parním motorem o výkonu 2 kW.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí čerpadlo, pístový parní motor, čerpadla, hydraulické okruhy

## ABSTRACT

The aim of my work is to research the field of pumping technology, specify the requirements for feed pumps for small energy blocks, determine the types of feed pumps and their properties. The next task is to design a connection of a selected feed pump in a system with a piston steam engine with a power of 2 kW.

## KEYWORDS

Feed pump, piston steam engine, pumps, hydraulic systems

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLČAPEK, J. *Technologie napájecích čerpadel do 100 kg/h vody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jířího Škorpíka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Josef Holčápek

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za pomoc a cenné poznatky. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Čerpadla.....	10
1.1 Parametry čerpadel .....	10
1.2 Fyzikální podobnost.....	10
1.3 Rozdělení čerpadel podle ČSN 11 0000 .....	11
2 Napájecí čerpadla malých energetických bloků .....	12
2.1 Problémy při čerpání nízkých průtoků.....	12
3 Typy napájecích čerpadel a jejich vlastnosti .....	13
3.1 Hydrodynamická čerpadla .....	14
3.2 Hydrostatická čerpadla .....	18
3.3 Požadavky na napájecí čerpadla .....	20
4 Pístový parní motor .....	25
4.1 Princip funkce .....	25
4.2 Rozdělení .....	25
5 Zapojení čerpadla s pístovým parním motorem .....	26
5.1 Volba čerpadla .....	26
5.2 Zapojení čerpadla.....	29
5.3 Armatury a potrubí.....	33
Závěr.....	34
Použité informační zdroje.....	35
Seznam použitých veličin a zkratk .....	38



## ÚVOD

Člověk využívá čerpadla už od starověku. V úplných začátcích se jako pohon používala zvířecí a lidská síla. Tu poté ve středověku nahradilo vodní kolo. První čerpadla, která se podobala dnešním, byla hydrostatická čerpadla. Odstředivá čerpadla zaznamenala rozvoj až v druhé polovině 19. století. V dnešní době jsou čerpadla nepostradatelná. Dokážou čerpat široké spektrum látek. Jsou používána v energetice, farmaceutickém průmyslu, zemědělství, potravinářství a vodním hospodářstvím. [16]

Tato práce je zaměřena na napájecí čerpadla, která hrají velmi důležitou roli v energetice. Využívají se především při výrobě páry a horké vody. Vyskytují se v elektrárnách, teplárnách, ale i v chemickém průmyslu. Volba vhodného napájecího čerpadla je důležitá pro celkovou efektivitu hydraulického okruhu, ve kterém je zapojeno.

Práci mám rozdělenou do pěti kapitol. V první kapitole se zabývám čerpadly a jejich hlavními parametry obecně. Druhá kapitola je věnována napájecím čerpadlům v malých energetických blocích. Třetí kapitola se podrobněji zabývá problematikou napájecích čerpadel, jejich typy a vlastnosti. Ve čtvrté kapitole je popsán základ činnosti a konstrukce pístového parního motoru. V kapitole pět jsou popsány tři druhy zapojení vybraného čerpadla s parním pístovým motorem o výkonu 2kW. V závěru jsou shrnuty dosažené poznatky.

# 1 ČERPADLA

Čerpadla jsou hydraulické stroje, které slouží k přeměně přiváděné mechanické energie na energii hydraulickou. Dalšími hydraulickými stroji jsou motory, reverzibilní stroje a složená soustrojí.

## 1.1 PARAMETRY ČERPADEL

Hlavními parametry těchto strojů jsou průtok a měrná energie. Tyto parametry vychází ze zákona zachování energie, zákona zachování hmotnosti a obecných zákonů fyziky. Vyjadřováním z těchto rovnic a zavedením určitých předpokladů dospějeme k rovnici kontinuity a Bernoulliho rovnici, které se používají v praxi. Průtok  $Q$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] definujeme jako objem kapaliny, která proteče daným průřezem stroje za jednotku času. Podle průtoku se určuje velikost stroje. Měrná energie je dána rozdílem energií mezi definovanými průřezy.

$$E = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot y \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Dalšími parametry hydraulických strojů jsou otáčky, účinnost a kavitační deprese. Otáčky jsou v případě čerpadel především charakteristickou hodnotou hnaného stroje. Účinnost určuje schopnost přeměny energie a její hospodárnost. Kavitační deprese určuje kavitační vlastnosti. Ke kavitaci dochází v čerpadlech v místech, kde tlak klesne pod hodnotu tlaku páry čerpaného média. Tento jev může čerpadlo vážně poškodit. Kavitaci se zabráňuje minimálním přetlakem v sacím hrdle čerpadla (čistý dostupný spád kavitační deprese). [1] [10]

## 1.2 FYZIKÁLNÍ PODOBNOST

Myslí se hlavně podobnost hydrodynamická. Slouží k rozřídění výsledků experimentů. Tyto výsledky se poté používají k navržení nových strojů a jejich provozních stavů. Hlavní výhodou je možnost použití podobnosti na modelu, který je poměrně malý a levný, a získání hodnot pro konkrétní dílo. Hydrodynamická podobnost má tři složky, kde každá je závislá na té předchozí. Těmito složkami jsou geometrická, kinematická a dynamická podobnost. [1]

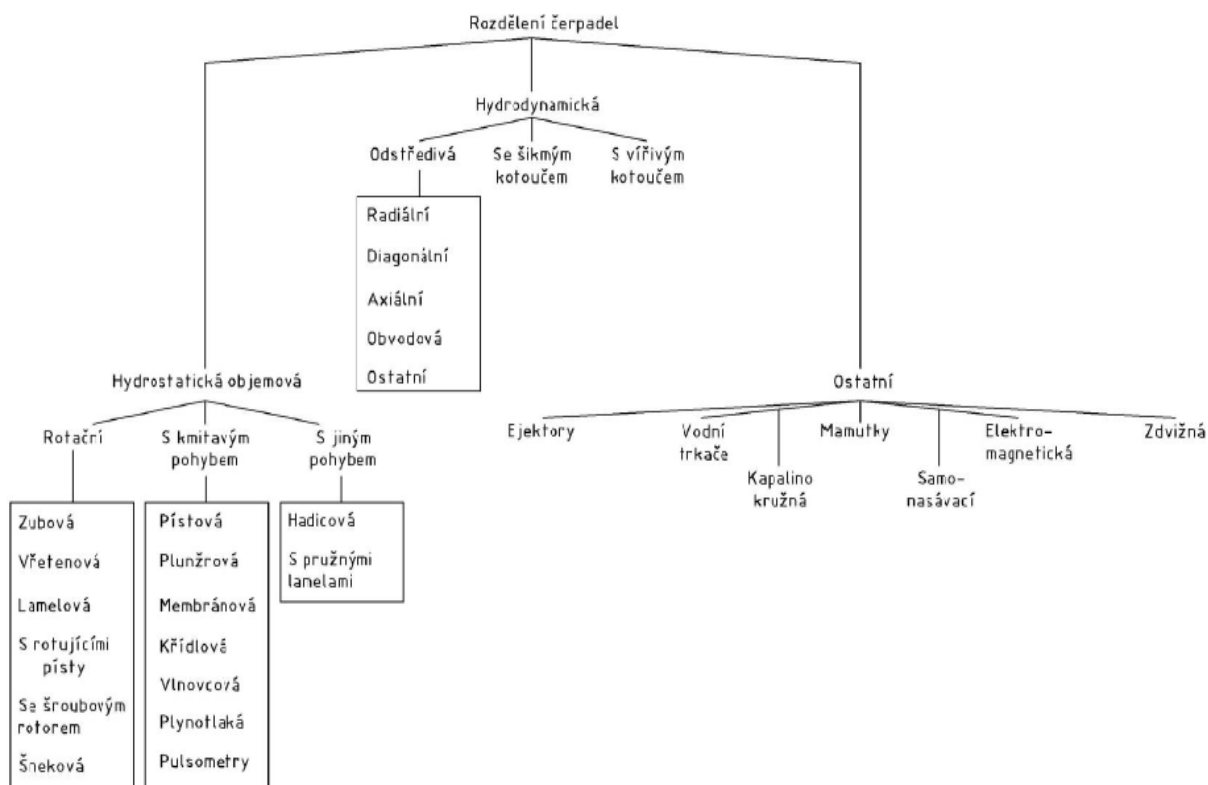
Geometrická podobnost znamená, že sobě odpovídající rozměry (světlost potrubí, drsnost povrchu a průměr oběžného kola) jsou ve stejném poměru. [1]

Kinematická podobnost je splněna tehdy, když v odpovídajících si bodech mají vektory rychlosti stejný směr a smysl. Poměr velikostí rychlosti musí být konstantní (podobné rychlostní trojúhelníky). [1]

Dynamická podobnost je na stejném principu jako kinematická, ale místo rychlosti uvažujeme síly působící v kapalině. Jedná se o síly tlakové (Eulerovo kritérium), síly působící při neustálém pohybu (Srouhalovo kritérium) a síly způsobené vazkostí kapaliny (Reynoldsovo číslo). Sloučení všech tří kritérií je v praxi prakticky nemožné, proto se slučuje pouze Strouhalovo kritérium s Eulerovým. Reynoldsovo číslo se promítá do hydraulické účinnosti. [1]

### 1.3 ROZDĚLENÍ ČERPADEL PODLE ČSN 11 0000

Schéma rozdělení ručních a strojních čerpadel podle normy ČSN 11 0000. Podle této normy rozdělujeme čerpadla do tří hlavních skupin: hydrodynamická, hydrostatická a ostatní. [11]



Obr. 1 Schéma rozdělení čerpadel podle ČSN 11 0000 [11]

## 2 NAPÁJECÍ ČERPADLA MALÝCH ENERGETICKÝCH BLOKŮ

Hlavním požadavkem na napájecí čerpadla v malých energetických blocích je schopnost čerpat nízké průtoky (cca.  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$ ). Mezi další požadavky patří schopnost pracovat s horkou napájecí vodou, dosahovat vysokých tlaků a plynulého průtoku. [22]

Jelikož jsou běžně dostupná čerpadla konstruována na větší průtoky, než jaké jsou potřeba v malých energetických blocích, je nutné, aby bylo možné regulovat jejich průtok na požadované hodnoty. Při použití hydrodynamických čerpadel je několik způsobů regulace průtoku. Tyto způsoby jsou blíže popsány v kapitolách 3.3 a 5.2. U hydrostatických čerpadel se regulace průtoku provádí změnou otáček motoru, změnou zdvihu pístu a obtokem zpět do sání čerpadla. [29]

### 2.1 PROBLÉMY PŘI ČERPÁNÍ NÍZKÝCH PRŮTOKŮ

#### 2.1.1 NÍZKÁ ÚČINNOST

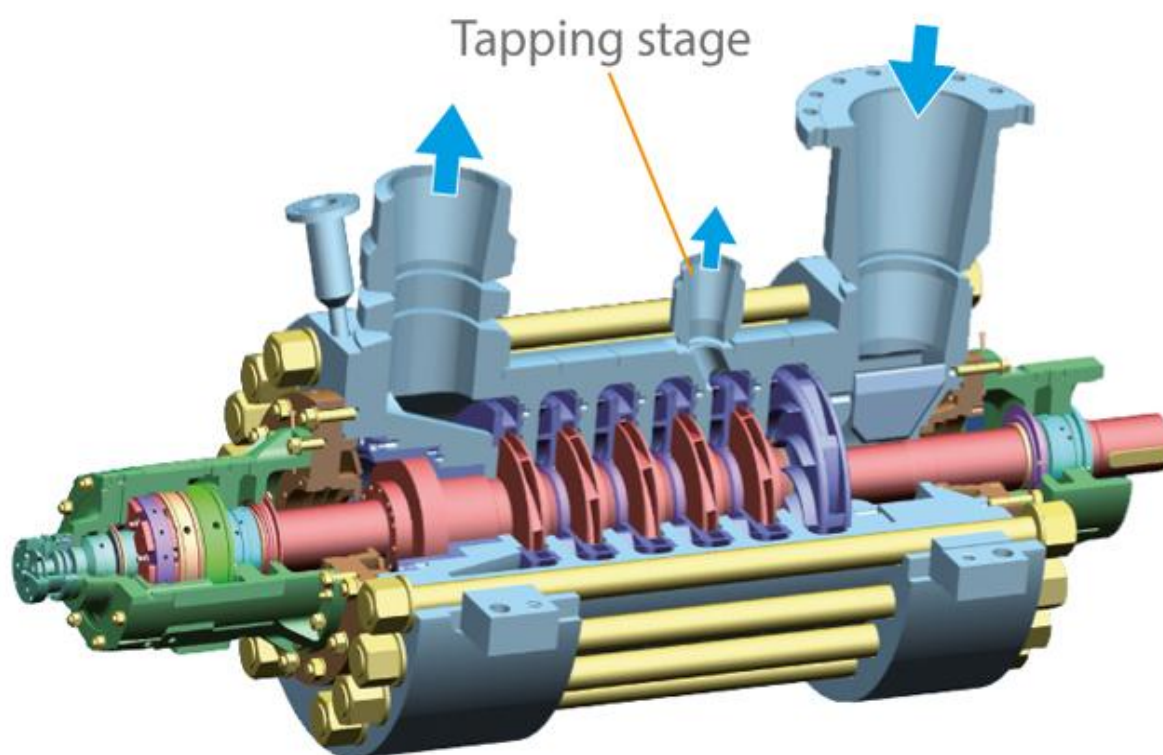
Při použití hydrodynamického čerpadla, k napájení zdroje páry při nízkém průtoku, je největší nevýhodou jeho nízká účinnost. Jako příklad můžu uvést vertikální článková odstředivá čerpadla od firmy Grundfos. Účinnost nejmenší velikostní řady těchto čerpadel, splňujících ostatní požadavky na napájecí čerpadla, je menší než 10 %. [23]

#### 2.1.2 TVORBA TEPLOTNÍCH VRSTEV

Dalším problémem je tvorba teplotních vrstev. Tyto vrstvy se vytvářejí při provozu s nízkým až nulovým průtokem. To způsobuje deformaci rotoru a později také neotočných komponent. Na rotor začne působit vyšší třecí moment, což může vést až k zastavení čerpadla. Následkem je nevyrovnání teploty rotoru a jeho větší poškození. Aby se tomuto poškození zabránilo, bývá čerpadlo vybaveno minimálním průtokovým ventilem. [20]

### 3 TYPY NAPÁJECÍCH ČERPADEL A JEJICH VLASTNOSTI

Jsou to čerpadla, která se používají k dopravě napájecí vody do kotlů nebo parních generátorů. Jedná se o vysokotlaká čerpadla. Zvyšují tlak na takovou hodnotu, aby mohla voda vstoupit do kotle a přetlačila tlak páry v kotli. Pára z kotle je poté využívána k pohánění turbín nebo parního pístového motoru. Nejčastěji se kvůli svým vlastnostem používají odstředivá čerpadla, ale pro některé aplikace jsou vhodná i čerpadla hydrostatická. Pro pomocné kotle vyžadující malé množství vody je možné použít vratná čerpadla s volným oběhem. Tato čerpadla jsou poháněna parou vyrobenou v kotli. [22]



Obr. 2 Řez odstředivým napájecím čerpadlem firmy KSB [20]

Médium, se kterým pracují, se nazývá napájecí voda. Tato voda se dodávána do kotlů na výrobu páry. Voda se obecně vyznačuje větší tepelnou kapacitou než většina ostatních látek. Napájecí voda pracuje v uzavřeném systému, není vystavena vlivům atmosféry. Pro správné fungování a dlouhou životnost technologií v oběhu je nutná úprava vody. Neosetřená voda by v extrémních tlakových a teplotních podmínkách způsobila mnoho problémů. Mezi ně můžeme zařadit přehřátí, nízkou účinnost přenosu tepla, vysoké náklady na údržbu a korozi. Pro snížení korozivních účinků je zapotřebí kvalitní a ošetřená voda. Ošetření napájecí vody spočívá v eliminaci korozních sloučenin pomocí odvzdušňovače. Jedná se především o odstranění kyslíku, který je hlavním důvodem koroze. Pro napájecí vodu do kotlů je důležité, aby byla zásaditá. Správné zásaditosti je dosaženo přidáním fosfátů. [24] [25]

### 3.1 HYDRODYNAMICKÁ ČERPADLA

Jsou to čerpadla, u kterých probíhá nepřímá přeměna mechanické energie na energii kinetickou a potenciální. Kinetická energie se na tlakovou mění v difuzoru. Pracovním prvkem jsou lopatky oběžného kola. Tyto lopatky mohou být proti ose rotace stavěny diagonálně, axiálně nebo radiálně. [1] [13]

#### 3.1.1 ROZDĚLENÍ PODLE PRACOVNÍHO PRINCIPU

Podle pracovního účelu můžeme hydrodynamická čerpadla rozdělit na napájecí, kondenzační a oběhová. Oběhová čerpadla slouží k překonávání hydraulických ztrát v hydraulickém oběhu. Nejčastěji se používají k cirkulaci teplé užitkové vody. Regulace se provádí podle diferenčního tlaku. [9]

Kondenzační čerpadla pracují s kapalinou, jejíž stav leží v blízkosti meze sytosti. Mez sytosti je spojnice bodů stavu syté páry. Kondenzát je čerpán do vyšších tlaků, proto je energie předaná kapalině vyšší než u oběhových čerpadel. [9] [14]

Napájecí čerpadla jsou obvykle vysokotlaká čerpadla dopravující napájecí kapalinu do kotle nebo parního generátoru. Nejčastěji se používají čerpadla článková, odstředivá diagonální nebo radiální. [7] [9]

#### 3.1.2 ROZDĚLENÍ PODLE PROUDĚNÍ KAPALINY

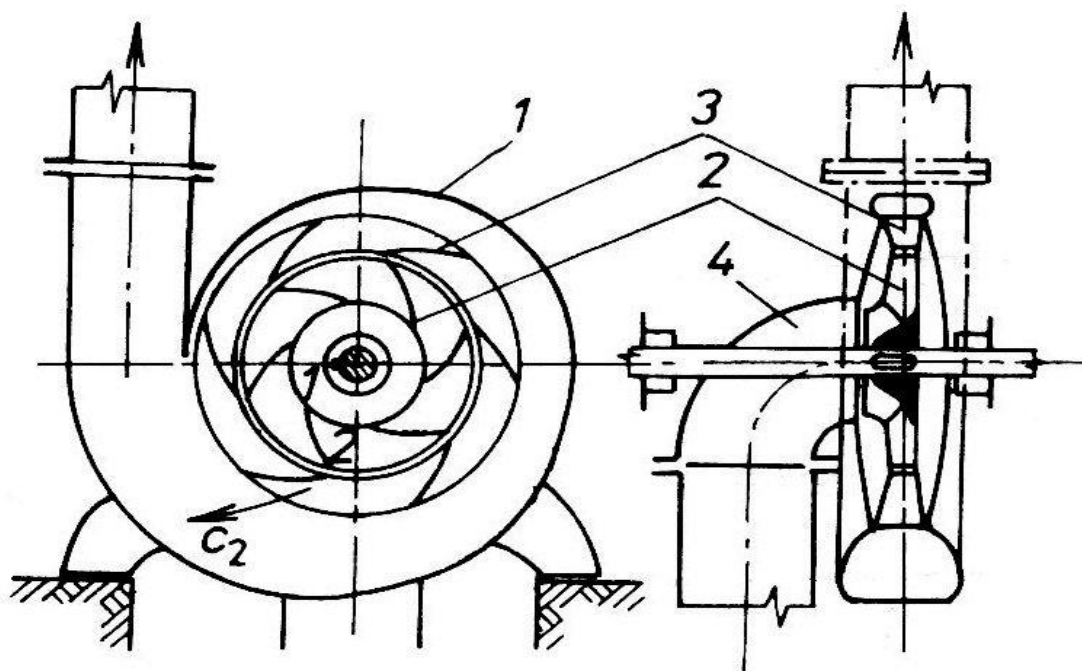
Jedná se o rozdělení podle směru proudění kapaliny v kanálech oběžného kola. Jsou to čerpadla radiální (odstředivá), diagonální (šroubová) a axiální (vrtulová). [2]

#### 3.1.3 ČERPADLA RADIÁLNÍ, ODSTŘEDIVÁ

Patří mezi nejobvyklejší typ čerpadel. V průmyslu se používají pro čerpání velkých objemů nízko a středně viskózních kapalin. Nehodí se na sytké nebo pevné látky. Jsou vhodná pro kontinuální dopravu, nikoliv pro provoz vyžadující časté zastavování a nabíhání čerpadla. Průtok závisí na několika faktorech, a proto nejsou vhodná pro čerpání přesného množství. Je to dáno především slabým sacím efektem. Z toho důvodu se před uvedením do provozu provádí zavodnění celého systému. [5] [15]

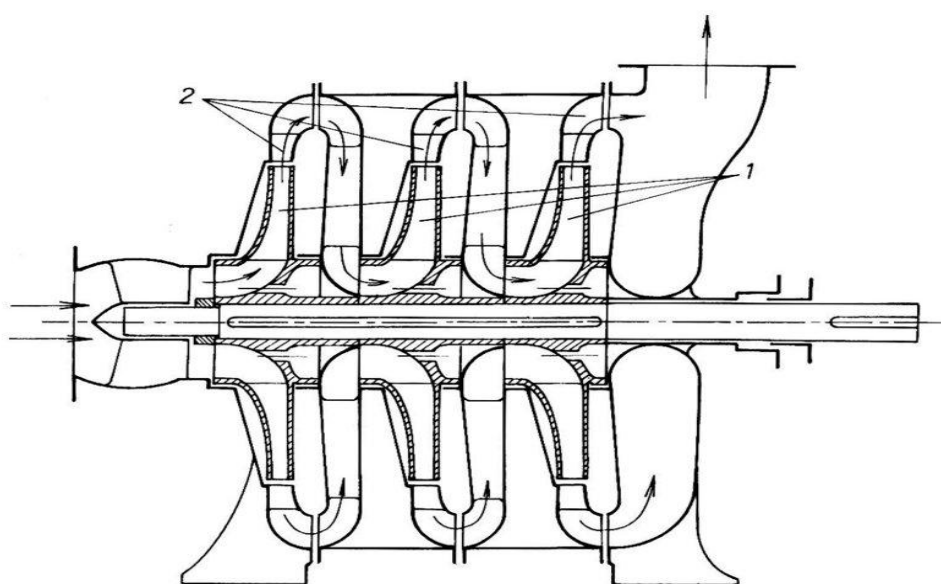
Jejich princip spočívá ve využití odstředivé síly působící na kapalinu. Odstředivé síly vznikají kvůli rotačnímu pohybu, který kapalině udělují zahnuté lopatky. Tyto lopatky jsou připevněné k rotoru (oběžnému kolu). Rotor je poháněn pevně spojenou hnací hřídelí. Vzniklé odstředivé síly kapalinu vypustí do výtlačného hrdla. Čerpaná látka není vytlačována samotnou silou lopatek, ale jen silou vzniklou při rotaci. Proto je výstupní tlak dán protitlakem následného potrubního systému a samotné čerpadlo je schopné generovat pouze průtok. Kapalina je za výtlačným hrdlem brzděna v difuzoru a tím dochází k přeměně její kinetické energie na energii tlakovou. Princip činnosti je podobný Francisově turbíně, jen kapalina proudí opačným směrem. Podle uspořádání oběžných kol dělíme odstředivá čerpadla na jednostupňová a více stupňová. [5] [15]

Jednostupňová čerpadla se používají pro nižší výstupní tlaky. Skládají se ze spirální skříně (1), oběžného kola (2), převaděče (3) a sacího hrdla (4). [5]



Obr. 3 Schéma jednostupňového čerpadla s převaděčem [26]

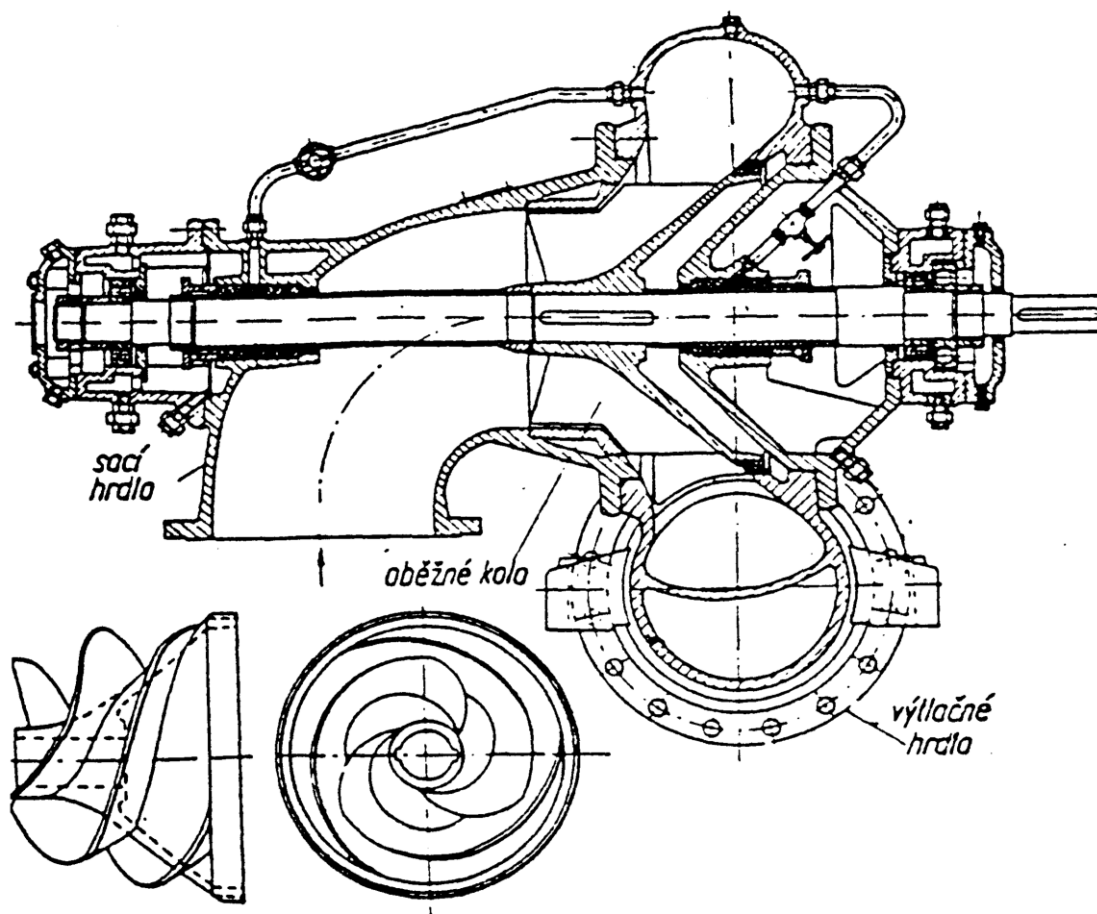
Vícestupňová odstředivá čerpadla se navrhují pro dosažení větších tlaků. Konstrukce je tvořena několika oběžnými koly na jedné hřídeli za sebou. Každé oběžné kolo předává kapalině svoji energii. Na obrázku 3 můžeme vidět řez tímto čerpadlem, oběžná kola (1) a převaděče (2). Převaděč slouží k převedení radiálního výstupu z jednoho kola na axiální vstup do kola následujícího. [5]



Obr. 4 Třístupňové odstředivé čerpadlo [26]

### 3.1.4 ČERPADLA DIAGONÁLNÍ, ŠROUBOVÁ

Používají se pro menší pracovní výšky a větší průtoky. Čerpaná kapalina proudí do oběžného kola ve směru axiálním a vystupuje šikmo k hřideli. Při vyšším počtu měrných otáček se vstupní hrana lopatky posouvá k sacímu hrdlu. Vůle mezi skříní a lopatkami se pohybuje od 0,3 mm až k 1 mm. Výstupní hrana má tvar šroubovice na kuželové ploše. Přeměna kinetické energie na tlakovou probíhá za oběžným kolem. Uplatnění najdou při dopravě chladicí vody v elektrárnách, pro odvodňování a zavodňování. [2] [17]

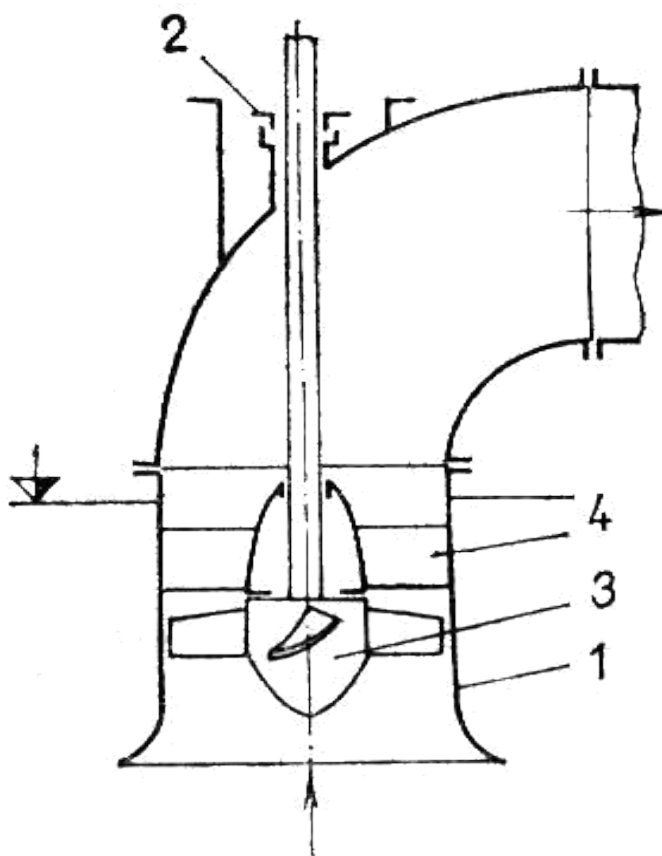


Obr. 5 Diagonální čerpadlo [27]



### 3.1.5 ČERPADLA AXIÁLNÍ, VRTULOVÁ

Uplatňují se v případě potřeby velkých průtoků a malých dopravních výšek. Vzhledem připomínají lodní vrtule. Vyznačují se nízkým počtem lopatek a vysokými měrnými otáčkami. Lopatky se mohou natáčet a tím regulovat průtok. S hodnotou měrných otáček souvisí konstrukce čerpadla. To především poměr průměru vnějšího kola s nábojem, který se pohybuje od 3 do 2,25, nebo délkou lopatek. Jelikož kapalina proudí čerpadlem stále v axiálním směru, je možné umístit oběžné kolo pod spodní hladinu. Tím se snižuje nebezpečí kavitace a čerpadlo se před spuštěním nemusí naplňovat čerpanou kapalinou. Konstrukce lopatek vrtulových čerpadel se liší od konstrukce ostatních odstředivých čerpadel. Používá se křídlových leteckých profilů. [2]



Obr. 6 Vrtulové čerpadlo [28]

## 3.2 HYDROSTATICKÁ ČERPADLA

Hydrostatická (objemová) čerpadla se vyznačují činným prostorem, který se střídavě vyprazdňuje a plní. Dochází zde k přímé přeměně mechanické energie na hydraulickou. Dělí se na čerpadla pístová a rotační. Pístová čerpadla se vyznačují větší účinností a menším počtem otáček než čerpadla odstředivá (hydrodynamická). [2]

### 3.2.1 PÍSTOVÁ ČERPADLA

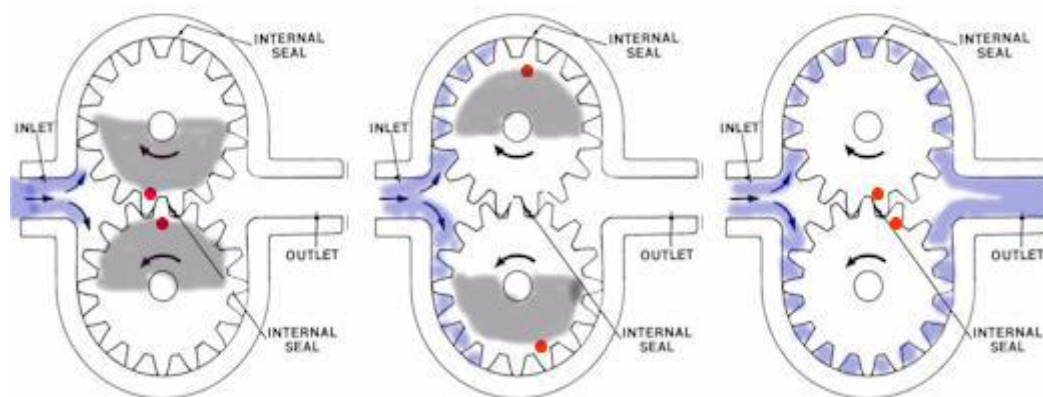
Základem všech pístových čerpadel a pump je dvoudobý cyklus, kdy se píst pohybuje od otevřeného otvoru sání k horní úvratí. Tím nasává čerpanou hmotu do válce, kterou následně pohybem k otevřenému otvoru výtlaku vytlačí pryč z válce pod zvýšeným tlakem. Tato čerpadla mají dobré sací schopnosti, proto jsou vhodná pro čerpání těžko čerpatelných látek. Nevýhodou je pulsace průtoku a složitá konstrukce, která zvyšuje prodejní cenu. [6]

### 3.2.2 ROTAČNÍ ČERPADLA

Dopravu kapaliny obstarává otáčení rotoru. U rotačních čerpadel nenalezneme žádné ventily, které uzavírají pracovní prostor. Řadíme sem čerpadla zubová, vřetenová, lamelová a čerpadla s rotujícími písty. [5]

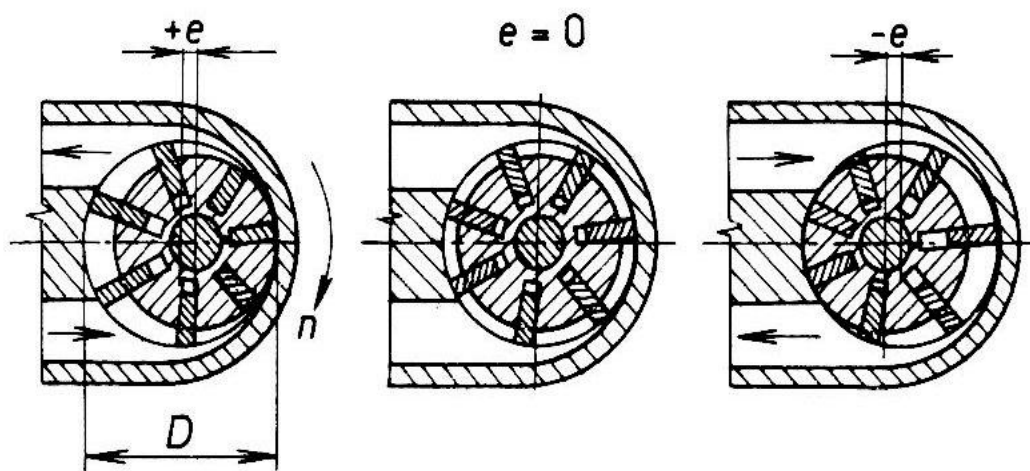
Princip rotačních pístových čerpadel je založen na posuvném pohybu pístu ve válci. Zdvih pohání rotující hřídel napojenou na vnější pohon. Obvykle se používá větší množství menších pístů. Díky schopnosti vytvářet vysoký tlak jsou používána v hydraulických systémech. Podle směru jejich vysouvání dělíme čerpadla na axiální a radiální. Axiální provedení je výhodné díky snadné regulaci průtoku při konstantních otáčkách, která se provádí změnou naklonění šikmého kotouče. [2] [5]

Zubová čerpadla fungují na principu přenášení malých dávek tekutiny v prostorách mezi zuby ozubených kol. Díky své jednoduché konstrukci a výrobě jsou velmi rozšířená. Dělí se na čerpadla s vnějším a vnitřním ozubením. Typ s vnějším ozubením se používá pro čerpání viskozních látek. Důvodem je, že viskozní látky snižují vnitřní tření. Z toho vyplývá dobré a přesné dávkování. Čerpadla s vnitřním ozubením jsou univerzální a hodí se pro všechny typy kapalin. Jsou samonasávací. Pracují na principu dvou do sebe zasazených kol vnějšího rotoru a vnitřního pastorku. [2] [8]



Obr. 7 Princip zubového čerpadla [8]

Lamelová čerpadla pracují díky posuvně uloženým lamelám v rotoru. Při jeho otáčení se lamely vysouvají a zasouvají a tím opisují eliptickou dráhu. Sání se provádí při vysouvání lamel, kdy se prostor mezi nimi zvětšuje a plní se čerpanou látkou. Během zasouvání lamel je kapalina vytlačena do výtlačného kanálu. Mohou pracovat jako čerpadla i jako hydromotory. Na rozdíl od zubových čerpadel jsou lamelová náročnější na přesnost při vyrábění. Hodí se na čerpání olejů s dokonalou čistotou. [1] [2]



Obr. 8 Lamelové čerpadlo [26]

Princip fungování vřetenových čerpadel je otáčení vřetene ve válcovém prostoru. Mezi vřetenem a válcovým žlabem je malá vůle. Při potřebě vyvinout při čerpání vysoký tlak se použije druhé vřeteno zabírající spolu s prvním. Je možné použít i více vřeten, čímž vzniknou vícevřetenová čerpadla, která předčí svojí účinností zubová čerpadla. [1]

### 3.3 POŽADAVKY NA NAPÁJECÍ ČERPADLA

Základními požadavky na napájecí čerpadla je schopnost dosahovat vysokých tlaků a konstantního průtoku. Dalšími jsou odolnost proti vysokým teplotám, korozi, spolehlivost a dlouhá životnost.

#### 3.3.1 REGULACE PRŮTOKU A TLAKU

Pro správnou funkci soustavy je třeba regulovat průtok a tlak na výtlaku čerpadla podle potřeby. To se provádí změnou otáček čerpadla, regulací průtoku škrcením nebo obtokem a natáčením lopatek oběžného kola. [34]

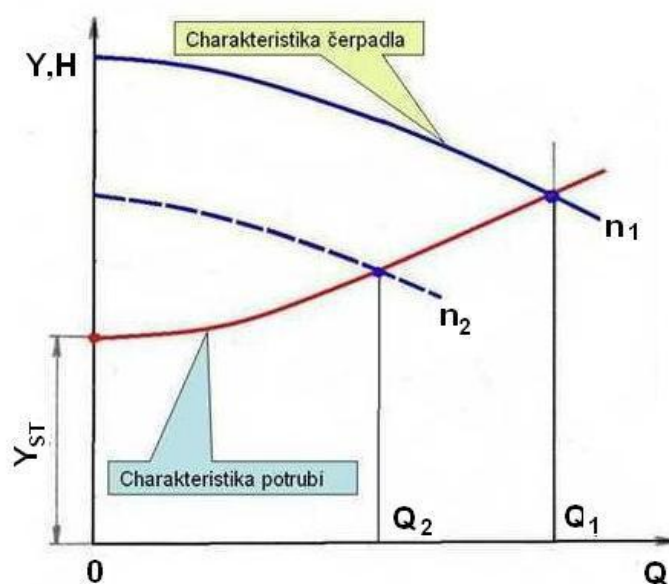
Princip regulace změnou otáček spočívá ve změně obvodové rychlosti. Pro poměr průtoku, dopravní výšky a příkonu v závislosti na otáčkách platí následující rovnice.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Samotná změna otáček se provádí frekvenčním měničem připojeným na elektromotor, který pohání čerpadlo. Měnič je k motoru připojen silovým kabelem. Ideální je umístit měnič co nejblíže elektromotoru kvůli eliminaci elektromagnetického rušení. Výhodou tohoto druhu regulace je dosažení optimálních provozních parametrů a úsporný provoz. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. [35] [36]



Obr. 9 Q-Y graf změny charakteristiky čerpadla při změně otáček [34]

Regulace průtoku škrcením se provádí regulační armaturou na výtlaku čerpadla, která mění charakteristiku potrubí. Je to jednoduchá regulace, jejíž nevýhodou je mechanické namáhání a opotřebení regulační armatury a snížení účinnosti čerpadla. Výhodou jsou nízké náklady. Nejčastěji se používá na nízké výkony čerpadel. [34] [35]



*Obr. 10 Regulační ventil [37]*

Při regulaci obtokem se přepouští část průtoku čerpaného média z výtlaku zpět do sání nebo přímo do napájecí nádrže. Používá se pro vysoké průtoky při nízkém tlaku kvůli odstranění nestabilní práce čerpadla (vrtulová čerpadla). Nevýhodou je špatná energetická účinnost a pořizovací náklady. [34] [35]

Průtok čerpadlem je také možné regulovat natáčením lopatek oběžného kola. Natáčení může být plynulé nebo skokové. Tento typ regulace se používá u axiálních čerpadel. Je to ekonomický způsob, při kterém se dosahuje vysokých účinností čerpadla. [34]

### **3.3.2 NAJÍŽDĚNÍ ČERPADEL**

Jednou z dalších důležitých vlastností čerpadel je způsob jejich uvádění do provozu. Spouštění čerpadel se provádí několika různými způsoby. Jedná se o start do uzavřeného nebo otevřeného výtlaku. Dalším požadavkem na napájecí čerpadla je schopnost zvládnout start za studena a polo-teplý start bez poškození. [20] [34]

Start do uzavřeného výtlaku se používá u radiálních čerpadel s nižšími otáčkami. Platí, že příkon a moment rostou se vzrůstajícím průtokem. Průtok roste postupným otevíráním armatury na výtlaku. Najíždění do otevřeného průtoku se používá pro čerpadla s vyššími měrnými otáčkami a nízkou hodnotou měrné energie. Kapalina se čerpá proti zpětné klapce umístěné na výtlaku čerpadla, která se působením kapaliny otevírá. [34]

U startů za studena a u polo-teplého startu dochází k prudkému vlévání horké napájecí vody do studeného čerpadla. Což má za následek mnohem větší zahřívání vnitřních částí oproti vnějším. Čím je tloušťka materiálu větší, tím pomaleji se materiálem šíří teplo a dochází ke zvyšování vnitřního napětí. To má negativní vliv na životnost čerpadla. [20]

### 3.3.3 POTRUBÍ MINIMÁLNÍHO OBTOKU

Potrubí minimálního obtoku slouží jako ochrana proti chodu čerpadla při mimořádných provozních stavech a rovněž chrání čerpadlo při najíždění. Důvodem je, že každé čerpadlo má požadovaný minimální průtok, který zajišťuje jeho spolehlivý chod. Pokud je průtok nižší než minimální požadovaný hrozí čerpadlu přehřátí, porucha mechanických těsnění, nadměrný hluk a vibrace. Pro zabránění těchto problémů se osazuje výtlačné hrdlo ventilem minimálního obtoku. Je to armatura, která slučuje funkci více armatur. Zpětného ventilu v hlavním směru průtoku (ke kotli) a přepouštěcího ventilu ve směru minimálního obtoku, který je veden zpět do napájecí nádrže. Pohyb těchto dvou ventilů je vzájemně propojen. Princip funkce je takový, že při plném odběru vody systémem je zpětný ventil otevřen a přepouštěcí uzavřen. Při snižování průtoku se zpětný ventil přivírá a postupně otevírá ventil přepouštěcí. Po dosažení minimálního průtoku se zpětný ventil zcela zavře a přepouštěcí je plně otevřen. [33]



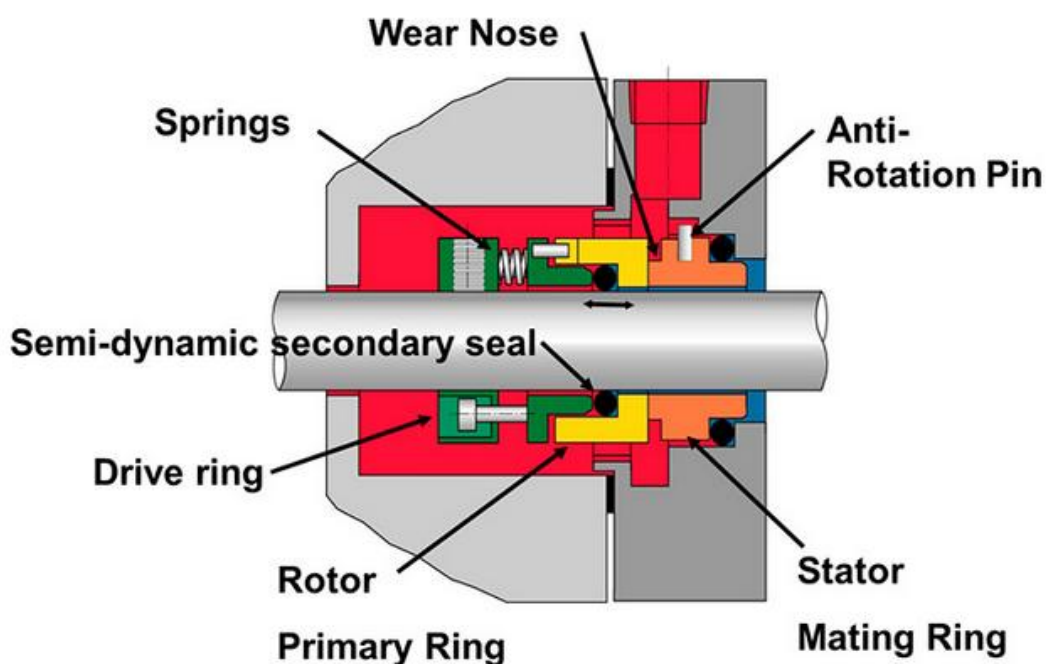
*Obr. 11 Ventil minimálního obtoku firmy Schroedahl [3]*

### 3.3.4 VOLBA UCPÁVEK

Dalším problémem u čerpadel je utěsnění hřídele. Řeší se výběrem vhodné ucpávky nebo bezucpávkovým provedením čerpadla. Volba vhodného utěsnění záleží na vlastnostech čerpané kapaliny. Pro napájecí čerpadla je nejdůležitější vlastností teplota čerpané kapaliny. Dva základní typy jsou měkké nebo mechanické ucpávky. [34]

Jako měkké ucpávky se používají slisované konopné provazce napuštěné tukem. Tyto provazce jsou za provozu stlačeny v těsnicí mezeře. Je to zastaralý typ těsnění, který je nutné pravidelně měnit. [34] [30]

Dnes se u většiny čerpadel používají mechanické ucpávky. Každá se skládá z rotační a stacionární části. Rotační část je tvořena dotykovou plochou (primární ucpávka), přitlačnou pružinou, pojistným kroužkem a sekundární ucpávkou. Pevná část je tvořena sedlem a pevným těsnicím prvkem. Pevná část je vsazena do tělesa čerpadla a rotační část je nasazena na hřídel. Těsnost zaručuje vznik správného mazacího filmu mezi primárními těsnicími plochami. Styk těchto ploch je dosažen tlakem pružiny a tlakem čerpané kapaliny. Mazací film může tvořit čerpaná kapalina nebo kapalina přiváděná ze speciálního zdroje. Druhy mazacího filmu dělíme na hydrodynamické a hydrostatické. Hydrostatický mazací film se tvoří za provozu vtlačováním čerpané kapaliny mezi styčné plochy nebo vtlačováním kapaliny ze speciálního zdroje mezi styčné plochy. Hydrodynamický film je tvořen tlakem vznikajícím od rotující hřídele. Kapalina v mezeře mezi styčnými plochami se obměňuje vlivem krouživého pohybu a odpařování kapaliny. U napájecích čerpadel jsou vhodné ucpávky s kovovým vlnovcem a ucpávky těsněné O-kroužky, které jsou ideální pro horkovodní a vysokotlakové aplikace. Klasické mechanické ucpávky také podléhají elektrické korozi. Ta je způsobena statickým nabíjením od rotačního pohybu a špatnou vodivostí napájecí vody, která není schopná toto napětí odklonit. Tento jev výrazně snižuje životnost napájecích čerpadel a je možné se mu vyhnout použitím mechanické ucpávky se systémem DLC. [21] [31] [32]



Obr. 12 Základní komponenty mechanické ucpávky [32]

### 3.3.5 KAVITACE

Ke kavitaci dochází, při poklesu tlaku čerpané kapaliny na hodnotu tlaku nasycených par. Za tohoto stavu v kapalině vznikají bubliny páry, které prouděním v čerpadle pokračují do míst s vyšším tlakem, kde zanikají. Jejich zánik způsobí zvýšení tlaku a totální hydraulický ráz. Dochází k poškození materiálu čerpadla trvalými deformacemi, mikrotrhlinami, vnitřním



napětím a únavou materiálu. Kavitaci většinou doprovází i zvukový efekt. Pro zabránění kavitace se musí v sacím hrdle čerpadla udržovat minimální přetlak. Tento přetlak se nazývá dostupný spád kavitační deprese a zabraňuje odpařování čerpané kapaliny. Pokud čerpadlo začne kavitovat, je nutné snížit průtok na výtláčném hrdle a tím hodnotu NPSH (net positive suction head). Důležité je nesnížit průtok natolik, aby se čerpadlo nepřestalo chladit a mazat. NPSH je veličina určující dostatečný tlak v čerpadle. Jednotkou jsou metry a představuje pokles tlakové energie daný výškou vodního sloupce. Graf závislosti NPSH na průtoku většinou uvádí výrobce v datasheetu čerpadla spolu s dalšími charakteristikami. [10] [34] [39]



*Obr. 13 Lodní šroub poškozen kavitací [38]*

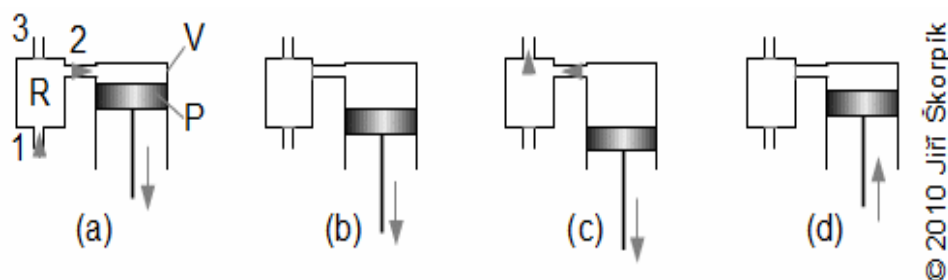


## 4 PÍSTOVÝ PARNÍ MOTOR

Je to stroj, který přeměňuje tepelnou energii vodní páry na energii mechanickou. Mechanická práce se z motoru odvádí převážně pomocí krouticího momentu na výstupní hřídeli. Používá se v parních obězích a v redukčních obězích na snižování tlaku vodní páry. Je to tepelný stroj s vnějším převodem tepla, díky čemuž lze využít téměř všechny tepelné zdroje. Výhodou pístových parních motorů je vyšší vnitřní termodynamická účinnost při nižších výkonech než u parních turbín. Vnitřní termodynamická účinnost je hlavním ukazatelem efektivity motorů. [4]

### 4.1 PRINCIP FUNKCE

Základními prvky konstrukce jsou píst, válec, rozvod páry a výstupní hřídel. Rozvod páry umožňuje přívod a odvod páry do válce. Tam pára díky tlaku působí silou na píst, který vykonává práci odváděnou formou krouticího momentu. Pracovní cyklus dělíme do čtyř částí, a to plnění, expanze, výfuk a komprese (obr. 7). Během plnění je do válce přiváděna pára o vysokém tlaku. Následuje expanze páry ve válci, při které se sníží její tlak a zvýší objem. Poté pára odchází z válce a následuje komprese. Počáteční a koncové části pracovního cyklu se označují, jako rozvodový okamžik. [4] [19]



Obr. 14 Pracovní cyklus parního pístového motoru [4]

### 4.2 ROZDĚLENÍ

Pístové parní motory můžeme dělit podle konstrukce rozvodů páry na šoupátkové a ventilové. Šoupátkový rozvod otvírá a uzavírá vstupní a výstupní otvory pohybem po ploše, do které jsou tyto otvory vyrobené. Válec může obsahovat jedno nebo až čtyři šoupátka. Při použití více šoupátek se lépe reguluje trvání jednotlivých dob. U ventilových rozvodů jsou ventily umístěny ve vyústění rozvodových kanálů. Jelikož je přes ventil možné jen jednosměrné proudění, musí mít každý válec výfukový a plnicí ventil. U stejnosměrného motoru stačí dva ventily a u dvojčinných jsou zapotřebí alespoň čtyři ventily. [4]

Dle pracovního principu je možné také rozdělení na dvojčinné a stejnosměrné motory nebo na motory s dělenou expanzí páry. Dvojčinné pístové parní motory se používají pro zvýšení výkonu jednoho válce. Toho je dosaženo tím, že z každé strany pístu probíhá stejný pracovní cyklus. Tyto cykly jsou vůči sobě posunuty o polovinu délky trvání. U stejnosměrných motorů je rozvod páry řízen pouze vstupem do válce. Výstup páry svým pohybem kolem dolní úvratě řídí píst otvíráním výfukových otvorů. U motorů s dělenou expanzí se dělí expanze páry do dvou a více válců. Tento princip se využívá při vysokých tlacích vstupní páry, u kterých by nebyl zaručen požadovaný tlak na konci expanze. [4]

## 5 ZAPOJENÍ ČERPADLA S PÍSTOVÝM PARNÍM MOTOREM

Pístový parní motor se v energetických jednotkách používá k využití odpadního tepla spalovacích procesů. Jeho použití pro malé výkony je výhodnější, jak použití parní turbíny. To je dáno vyšší termodynamickou účinností motoru než parní turbíny při stejném tepelném příkonu. [12]

### 5.1 VOLBA ČERPADLA

Napájecí čerpadlo je potřeba zvolit v závislosti na výkonu motoru. Ve zvoleném zapojení je dle zadání parní pístový motor o výkonu 2 kW. Pro správnou volbu čerpadla je potřeba znát spotřebu páry motoru a vstupní tlak páry. Tyto parametry byly zadány vedoucím práce.

#### Spotřeba páry motoru za hodinu

$$m = 100 \text{ kg}$$

#### Vstupní tlak

$$p_v = 0,6 \text{ MPa}$$

Na základě těchto údajů jsou určeny základní požadované parametry čerpadla. Průtok  $Q_l$  a výstupní tlak  $p_{vč}$ . Průtok zjistíme ze zákona o zachování hmotnosti. Pro výstupní tlak bude platit vztah  $p_{vč} = p_v + p_z$ , kde  $p_z$  je tlaková rezerva na pokrytí tlakových ztrát mezi výtlakem čerpadla a vstupem do motoru (ztráty v potrubí, kotli a armaturách). Tlaková rezerva je zvolena  $p_z = 0,1 \text{ MPa}$ .

#### Průtok čerpadla

$$Q_{\dot{c}} = 100 \text{ kg/hod}$$

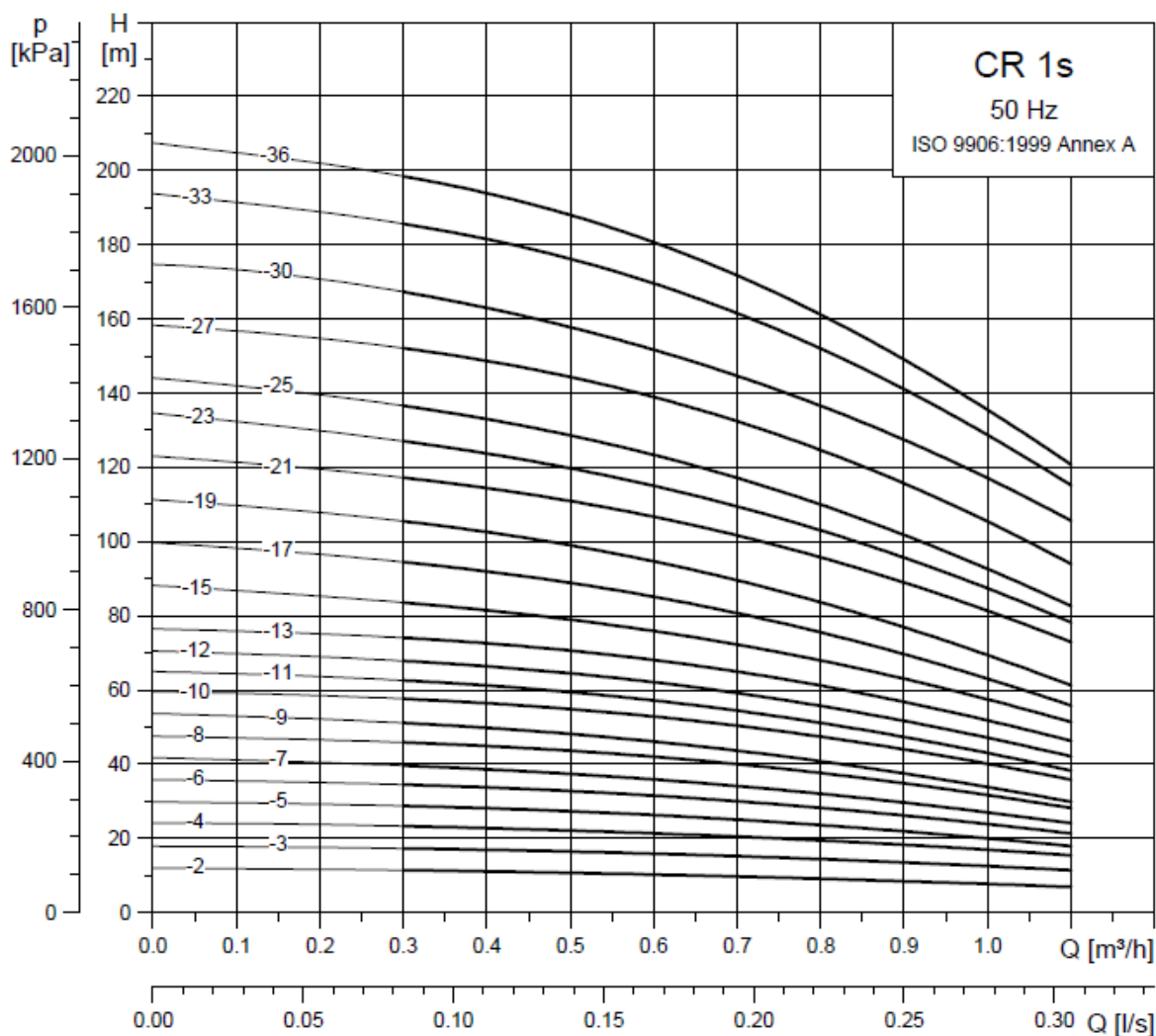
#### Výstupní tlak

$$p_{vč} = 0,7 \text{ MPa}$$

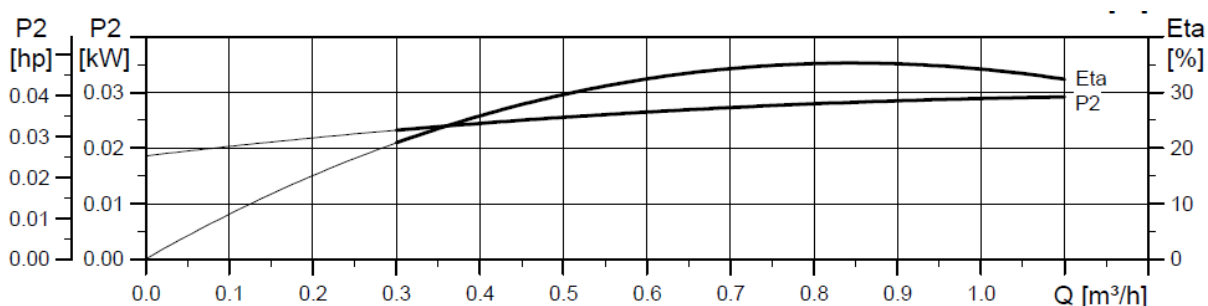
Dalším požadavkem je schopnost čerpadla pracovat s horkou, chemicky upravenou a zásaditou napájecí vodou.

Na základě těchto podmínek bylo zvoleno čerpadlo CR 1s od firmy Grundfos. Jedná se o vertikální, vícestupňové, odstředivé čerpadlo. CR je označení pro materiálové provedení čerpadla, kde je hlava a základová část čerpadla vyrobena z litiny a všechny části, které se dostanou do kontaktu s vodou z korozivzdorné oceli EN 1.4301. Označení 1s udává velikost čerpadla. Napojení na potrubí bylo zvoleno v přírubovém provedení o velikosti DN25. Maximální vstupní tlak je 10 barů a maximální provozní tlak 16 barů. Čerpadlo se dodává s klasickou hřídelovou ucpávkou, díky které je schopno pracovat s kapalinou teplotě -40 až 120 °C. V případě extrémních teplot (do 180 °C) může být na požádání vybaveno speciální vzduchem chlazenou ucpávkou. [23]

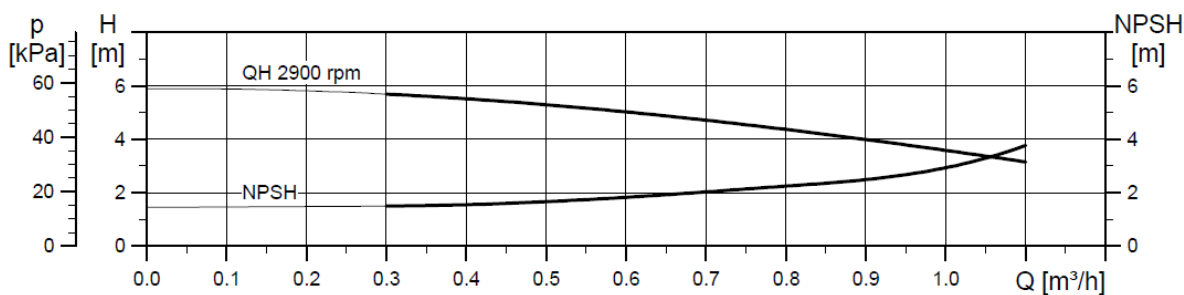
Na obrázcích 15, 16 a 17 jsou vidět hlavní charakteristiky čerpadla jako závislost dopravní výšky na průtoku, účinnost a NPSH charakteristika.



Obr. 15  $Q$ - $H$  charakteristika čerpadla CR 1s [23]

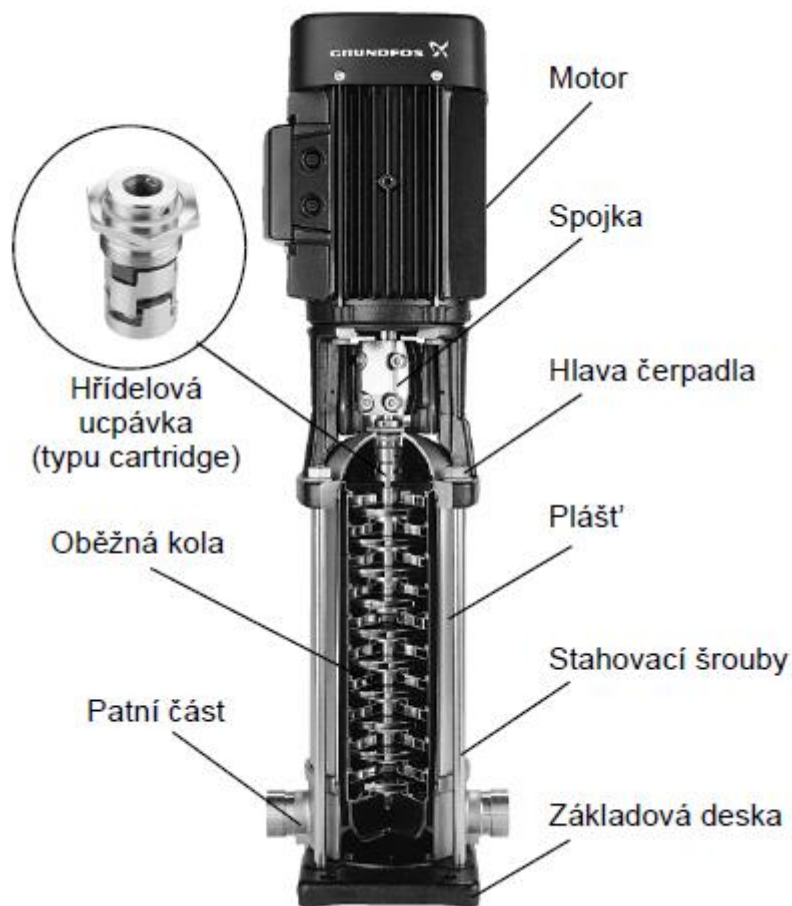


Obr. 16 Křivka účinnosti a příkonu čerpadla CR 1s [23]



Obr. 17 NPSH charakteristika čerpadla CR 1s [23]

Jako pohon tohoto typu čerpadla se dodává elektromotor Grundfos MG s výkonem od 0,37 do 1,1 kW ve třífázovém provedení nebo na požádání v jednofázovém provedení. Byl zvolen třífázový motor o výkonu  $P = 0,37 \text{ kW}$ . Jedná se, klasický, uzavřený dvoufázový motor s třídou krytí IP55. Požadovaná frekvence napájecí sítě je 50 Hz. [23]

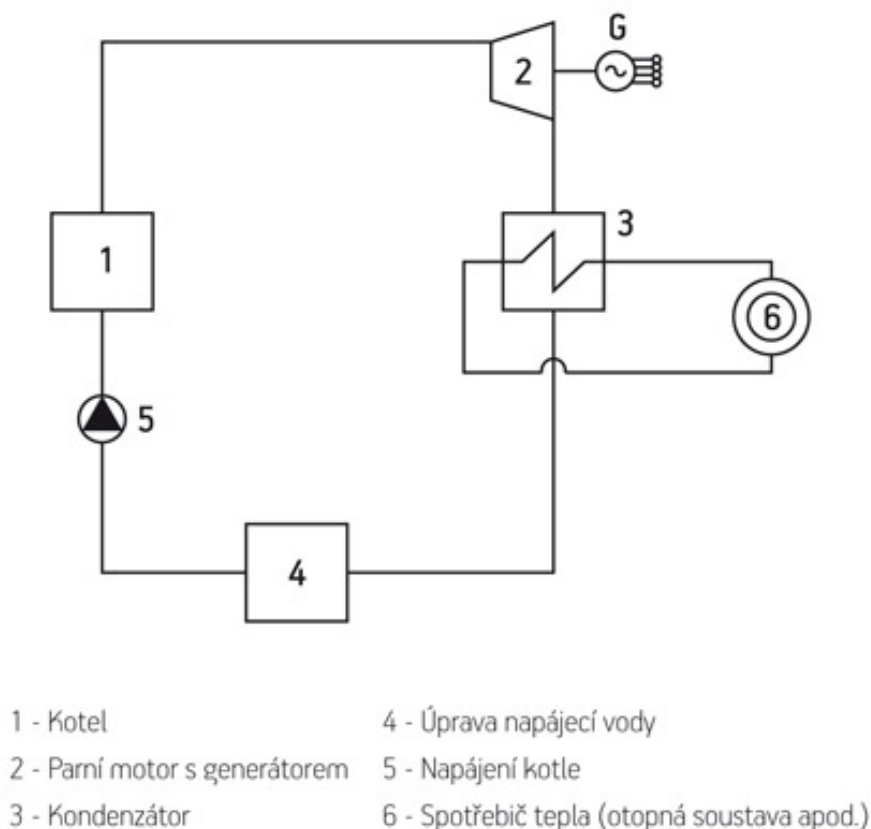


Obr. 18 Čerpadlo CR s motorem MG a označením hlavních částí [23]

## 5.2 ZAPOJENÍ ČERPADLA

Hlavní princip funkce a zapojení navrženého okruhu je následující. Voda z napájecí nádrže (NN) je napájecím čerpadlem (NČ) dopravována do kotle (K), kde se jí předá teplo a změní se na páru. Pára z kotle pohání pístový parní motor (PPM), který je připojen na synchronní generátor (SG) sloužící k výrobě elektrické energie. Z motoru vychází pára o nízkém tlaku a je přivedena do kondenzátoru (KON). Tam zkondenzuje a je kondenzačním čerpadlem vedena zpět do napájecí nádrže. Teplo odevzdané při kondenzaci se dále může využít v okruhu s tepelným spotřebičem (TS) a oběhovým čerpadlem. [12]

Byly zvoleny tři různé druhy zapojení čerpadla. U každého je stejný výše uvedený hlavní princip, ale liší se v zapojení na trase mezi čerpadlem a motorem (viz obrázky 19, 20 a 21). Různé zapojení slouží pro zajištění vhodné regulace průtoku a tlaku napájecí vody na požadované hodnoty.



Obr. 19 Schéma parní jednotky [12]

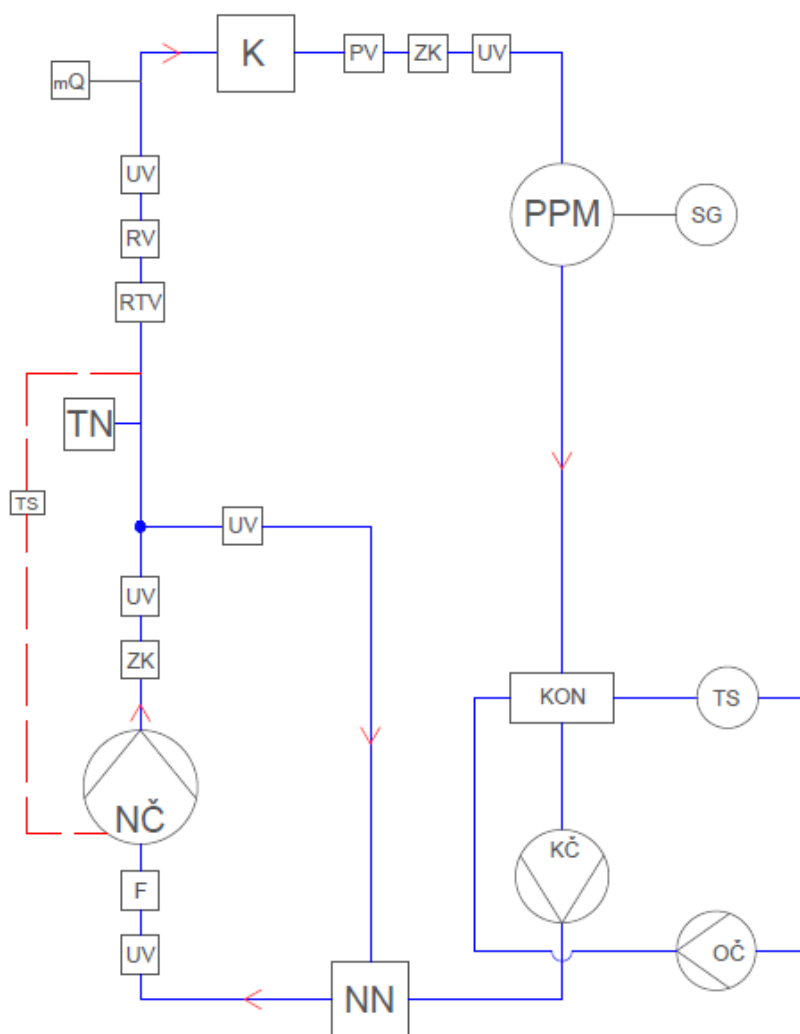
### 5.2.1 ZAPOJENÍ S PŘETRŽITÝM PRŮTOKEM

Pro tento typ zapojení byl zvolen typ čerpadla CR 1s-17, kde číslice 17 označuje počet stupňů čerpadla. Jedná se o čerpadlo popsané v kapitole 5.1. Požadované parametry soustavy jsou průtok  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$  a tlak  $0,7 \text{ MPa}$ .

Principem tohoto zapojení je napouštění a vypouštění tlakové nádoby. Čerpadlo zvyšuje tlak a objem napájecí vody v tlakové nádobě na hodnotu tlaku  $0,9 \text{ MPa}$ . V době plnění a tlakování bude část průtoku napájet systém hodnotou požadovaného průtoku  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$  zbývající část průtoku jde do tlakové nádoby. Při dosažení tlaku  $0,9 \text{ MPa}$  v tlakové nádrži se přes tlakový spínač (TS) odstaví čerpadlo z provozu. Systém je poté napájen z tlakové nádoby až do chvíle, kdy klesne tlak v nádobě na  $0,7 \text{ MPa}$ . Poté tlakový spínač opět uvede čerpadlo do provozu. Tento cyklus se bude pořád opakovat. Pracovní bod je hledán na křivce čerpadla podle tlaku  $0,9 \text{ MPa}$ . To odpovídá průtoku  $0,45 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Pro tento provozní bod je účinnost samotného čerpadla  $26,2 \%$  a účinnost čerpadla společně s motorem  $21 \%$ . Příkon vyžadovaný čerpadlem je  $0,422 \text{ kW}$ . [18]

Dále je potřeba určit dobu plnění tlakové nádoby a dobu vyprazdňování tlakové nádoby. Ty jsou určeny podle provozního bodu čerpadla a objemu tlakové nádoby. Pro objem nádoby  $5 \text{ litrů}$  vychází doba plnění  $51,6 \text{ sekund}$  a doba vyprazdňování  $178,6 \text{ sekund}$ . To odpovídá 15 sepnutím čerpadla za hodinu.

Požadovaný průtok a tlak, z tlakové nádrže dále do systému, obstará regulační ventil (RV) a regulátor tlaku vody (RTV).

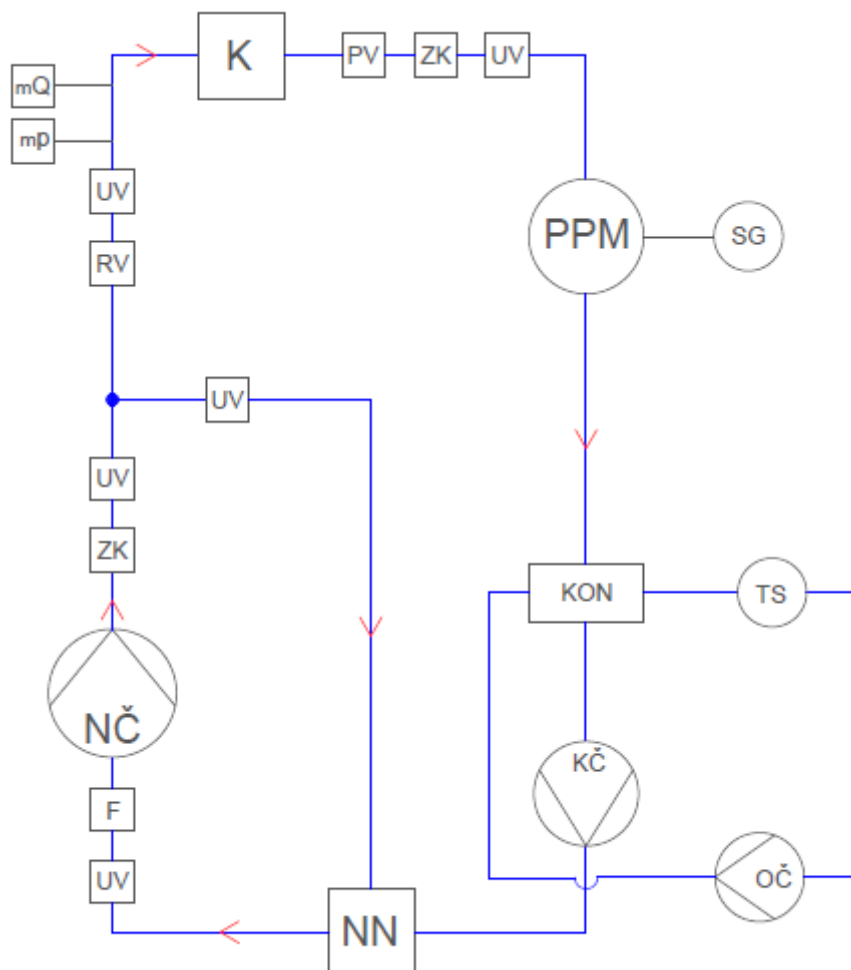


Obr. 20 Schéma zapojení s přetržitým průtokem

### 5.2.2 ZAPOJENÍ S NEPŘETRŽITÝM PRŮTOKEM A REGULACÍ ŠKRCENÍM

Pro toto zapojení byl zvolen typ čerpadla CR 1s-13. Požadované parametry soustavy jsou průtok  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$  a tlak  $0,7 \text{ MPa}$ . Z Q-H charakteristiky bylo určeno, že vybrané čerpadlo bude mít při požadovaném tlaku průtok  $0,3 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Z těchto hodnot se určí provozní bod čerpadla. Pro tento provozní bod je účinnost samotného čerpadla  $21,1 \%$  a účinnost čerpadla společně s motorem  $16,5 \%$ . Příkon vyžadovaný čerpadlem je  $0,285 \text{ kW}$ . [18]

Požadovaného průtoku je dosaženo přivřením regulačního ventilu (RV). Zároveň dojde ke zvýšení tlakové ztráty ventilu. Tyto změny mají za následek posunutí provozního bodu čerpadla na charakteristické křivce směrem doleva na hodnotu průtoku  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Pro tento provozní bod klesne účinnost samotného čerpadla na 8,6 % a účinnost čerpadla společně s motorem na 6,6 %. Čerpadlem vyžadovaný příkon klesne na  $0,246 \text{ kW}$ . [18]

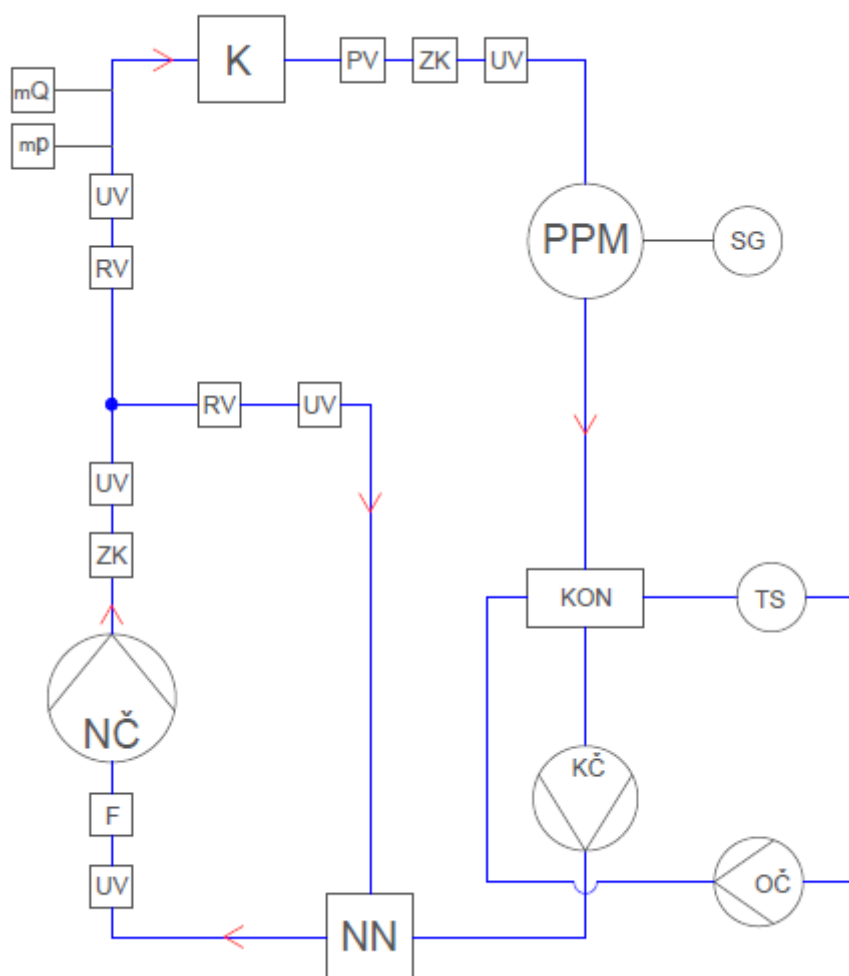


Obr. 21 Schéma zapojení s nepřetržitým průtokem a regulací škrcením

### 5.2.3 ZAPOJENÍ S NEPŘETRŽITÝM PRŮTOKEM A REGULACÍ OBTOKEM

Pro toto zapojení je zvolen typ čerpadla CR 1s-13. Požadované parametry soustavy jsou průtok  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$  a tlak  $0,7 \text{ MPa}$ . Z Q-H charakteristiky je určeno, že vybrané čerpadlo bude mít při požadovaném tlaku průtok  $0,3 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Z těchto hodnot se určí provozní bod čerpadla. Pro tento provozní bod je účinnost samotného čerpadla  $21,1 \%$  a účinnost čerpadla společně s motorem  $16,5 \%$ . Příkon vyžadovaný čerpadlem je  $0,285 \text{ kW}$ . [18]

Pro správné fungování soustavy je potřeba nastavit regulační ventily (RV) podle hodnot odečtených z průtokoměru (mQ) a manometru (mp). Odečtené hodnoty se musí rovnat požadovaným parametrům soustavy. Výsledkem bude průtok směrem do kotle  $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$  a průtok zpět do napájecí nádrže  $0,2 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Z toho vyplývá, že dvě třetiny průtoku jsou vráceny zpět do napájecí nádrže. [18]



Obr. 22 Schéma zapojení s nepřetržitým průtokem a regulací obtokem



### 5.3 ARMATURY A POTRUBÍ

Pro správný a bezpečný chod soustavy je sání čerpadla chráněno filtrem a uzavíracím ventilem. Znečištění síta se kontroluje měřením tlakové difference na sítu. Výtlak čerpadla je chráněn zpětnou klapkou a uzavíracím ventilem. Zpětná klapka je armatura sloužící k zamezení zpětného proudění. Protože regulační ventily nejsou dokonale těsnící armatury, tak jsou doplněny uzavíracími ventily. Pro měření průtoku je použit indukční průtokoměr. K měření tlaku je instalován tlakový snímač s manometrem. Potrubí výstupu páry z kotle je osazeno pojišťovacím ventilem, zpětnou klapkou a uzavíracím ventilem. Celá sestava musí být opatřena v nejvyšším místě odvzdušněním a ve vhodném nejnižším místě odvodněním. Pro speciální provozní stavy jsou všechny zapojení opatřena trasou minimálního obtoku.

Potrubí je navrženo z oceli P235GH, která je vhodná pro dané použití. Jmenovitý průměr potrubí, tvarovek a armatur je DN25. Jednotlivé části potrubí budou spojeny svarovým spojem. Připojení k armaturám, čerpadlům a ostatním strojům bude provedeno pomocí přírubových spojů. Příruby budou vyrobeny podle normy EN 1092-1 a z oceli P250GH.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést rešerši napájecích čerpadel, zjistit typy a vlastnosti napájecích čerpadel. Dále bylo úkolem určit požadavky na napájecí čerpadlo pro malé energetické bloky a návrh zapojení vybraného čerpadla v okruhu s pístovým parním motorem o výkonu 2 kW.

Pro uvedení do problému je první kapitola věnována základním parametrům čerpadel, fyzikálním podobnostem a rozdělení podle normy ČSN 11 0000. Hlavními parametry jsou průtok a měrná energie, které vycházejí ze základních fyzikálních rovnic. Fyzikální podobnost se používá k zpracování výsledků experimentů a tím k návrhu nových strojů. Podobnost je geometrická, kinematická a dynamická.

Druhá kapitola se zabývá napájecími čerpadly v malých energetických blocích. Zde je největším problémem nízká účinnost pro požadované hodnoty průtoku ( $0,1 \text{ m}^3/\text{hod}$ ) a tvorba teplotních vrstev.

Třetí kapitola pojednává o napájecím čerpadle obecně. Napájecí čerpadla slouží k dopravě vody do kotlů nebo vyvíječů páry. Nejčastěji se jako napájecí čerpadla používají čerpadla odstředivá. Důvodem je jejich schopnost produkovat vysoké průtoky, které moderní a výkonné energetické bloky vyžadují. Dalším požadavkem je schopnost vyvíjet vysoké výtlačné tlaky, kvůli přetlačení tlaku páry v kotli. Mezi největší problémy patří kavitace, poruchovost a snížená životnost při studených startech a za chodu s nízkým průtokem. U napájecích čerpadel je důležitá volba mechanické ucpávky, způsob nájíždění a způsob regulace průtoku.

Parní pístový motor je stroj přeměňující energii vodní páry na energii mechanickou. Jeho využití v energetických systémech je dáno lepší vnitřní termodynamickou účinností při nižších, než s kterou jsou schopny pracovat parní turbíny. Pro zvýšení výkonů jednoho válce se používají dvojčinné motory.

V páté kapitole je navrženo zapojení vybraného čerpadla do okruhu s parním pístovým motorem o výkonu 2 kW. Výběr čerpadla byl proveden na základě spotřeby páry motoru za hodinu a tlakem na vstupu do motoru. Podle těchto parametrů bylo vybráno vertikální článkové odstředivé čerpadlo od firmy Grundfos s typovým označením CR-1s. Následně byly navrženy tři druhy zapojení lišící se v regulaci průtoku. V prvním okruhu byla regulace provedena zapojením čerpadla v přetržitém provozu s použitím tlakové nádoby. Ve druhém zapojení byl průtok regulován škrcením na požadovanou hodnotu regulačním ventilem na výtlačku čerpadla. U posledního zapojení se průtok reguloval obtokem zpět do napájecí nádrže.

Vybrané čerpadlo pracovalo s největší účinností čerpadla (26,2 %) v okruhu s přetržitým provozem a s nejnižší účinností čerpadla (8,6 %) při regulaci škrcením regulačním ventilem. Spotřeba elektrické energie čerpadla za jeden den vychází nejlépe pro zapojení s přetržitým průtokem (2,23 kWh) a nejhůře pro regulaci obtokem (6,84 kWh). Na základě dosažených výsledků vychází jako nejoptimálnější zapojení s regulací přetržitým průtokem.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MELICHAR, Jan, Karel BRADA a Jaroslav BLÁHA. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02657-4.
- [2] NECHLEBA, Miroslav, HUŠEK, Josef. *Hydraulické stroje*, 1966. Vydání první.
- [3] The Schroedahl pump protection valve. *Schroedahl* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.schroedahl.de/en/products/pump-protection-valves/>.
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. Pístový parní motor (Parní stroj), *Transformační technologie*, 2010-06, [last updated 2012-04]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/28.html>. English version: Steam piston engine. Web: [http://www.transformacni-technologie.cz/en\\_28.html](http://www.transformacni-technologie.cz/en_28.html).
- [5] DRUHY ČERPADEL. *Rotační čerpadla* [online]. [cit. 3.3.2018]. Dostupný na WWW: <http://druhy-cerpadel.cz/hydrostaticka/rotacni-cerpadla/>
- [6] VOJÁČEK. *Pístová čerpadla* [online]. [cit. 3.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-6dil-pistova-cerpadla>
- [7] AQUA-STYL. *Napájecí čerpadla* [online]. [cit. 7.3.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.aqua-styl.cz/produkty-a-sluzby/energetika/napajeci-cerpadla/>
- [8] VOJÁČEK. *Zubová čerpadla* [online]. [cit. 10.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-1dil-zubova-cerpadla>
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2017-01-29]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html>. English version: Turbomachine. Web: [http://www.transformacni-technologie.cz/en\\_11.html](http://www.transformacni-technologie.cz/en_11.html).
- [10] GRUNDFOS. *Co je to kavitace?* [online]. [cit. 10.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://cz.grundfos.com/servis-a-podpora/support-contact/faq/what-is-cavitation.html>
- [11] ČSN 11 0000 Rozdělení a terminologie čerpadel. Praha: Český normalizační institut 1994, 1994.
- [12] TENZA. *Parní motory* [online]. [cit. 19.3.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/parni-motory/>
- [13] DRUHY ČERPADEL. *Hydrodynamická čerpadla* [online]. [cit. 21.3.2018]. Dostupný na WWW: <http://druhy-cerpadel.cz/hydrodynamicka/>
- [14] E-ČERPADLA. *Čerpadla oběhová* [online]. [cit. 23.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.e-cerpadla.cz/obehova-cerpadla-c-18.html>
- [15] VOJÁČEK. *Odstředivá čerpadla* [online]. [cit. 25.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-4dil-odstrediva-cerpadla>

- [16] PUMPS & SYSTEMS STAFF. *The History of Pumps: Through the Years* [online]. [cit. 30.3.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/pumps/history-pumps-through-years>
- [17] HRUŠKA. *Diagonální hydrodynamická čerpadla* [online]. [cit. 1.4.2018]. Dostupný na WWW: [http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan\\_Hruska\\_MUC\\_soubory/page0019.htm](http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0019.htm)
- [18] Grundfos [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://product-selection.grundfos.com/catalogue.cr%201s.cr%201s.html?fbclid=IwAR0A\\_6lTN8PM0ySvUOont-ILoHsmPXfaQamr\\_v\\_eGZNGjMTYo8mD-4ekpyE&hits=12560&qcid=573787875&searchstring=CR&time=1558629015862&typecode=CRFAM](https://product-selection.grundfos.com/catalogue.cr%201s.cr%201s.html?fbclid=IwAR0A_6lTN8PM0ySvUOont-ILoHsmPXfaQamr_v_eGZNGjMTYo8mD-4ekpyE&hits=12560&qcid=573787875&searchstring=CR&time=1558629015862&typecode=CRFAM)
- [19] BOURNE. *A Catechism of the Steam Engine* [online]. [cit. 7.4.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.gutenberg.org/files/10998/10998-h/10998-h.htm>
- [20] KSB. *Boiler feed pump* [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/boiler-feed-pump/191374/>
- [21] AURORA. *One & Two Stage Turbines/Multi-Stage Vertical In-Line Boiler Feed Pumps* [online]. [cit. 13.4.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.callaghanpump.com/wp-content/uploads/2016/12/Aurora280Bulletin.pdf>
- [22] CORROSIONPEDIA. *Feed pump* [online]. [cit. 20.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.corrosionpedia.com/definition/496/feed-pump>
- [23] Technický katalog Grundfos: *Vertikální článková odstředivá čerpadla*. 2019.
- [24] LENNTECH. *boiler-feedwater-characteristics* [online]. [cit. 29.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.lenntech.com/applications/process/boiler/boiler-feedwater-characteristics.htm> CORROSIONPEDIA. *Feedwater* [online]. [cit. 23.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.corrosionpedia.com/definition/497/feedwater>
- [25] CORROSIONPEDIA. *Feedwater* [online]. [cit. 5.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.corrosionpedia.com/definition/497/feedwater>
- [26] ELUC. *Objemová čerpadla* [online]. [cit. 6.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1925>
- [27] MIKEL. *Odstředivá čerpadla* [online]. [cit. 7.5.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.strojirenstvi.wz.cz/image.php?subject=2&class=11&topic=84&image=0>
- [28] HRUŠKA. *Axiální hydrodynamická čerpadla* [online]. [cit. 12.5.2018]. Dostupný na WWW: [http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan\\_Hruska\\_MUC\\_soubory/page0018.htm](http://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0018.htm)
- [29] RICHTER, Miroslav. Maloodpadové a čistší technologie: *Doprava kapalin*. (přednáška) Ústí nad Labem, UJEP, Fakulta životního prostředí, 15.12.2015.

- [30] Typ ucpávky. *SIGMAshop* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sigmashop.cz/clanky/typ-ucpavky>
- [31] *Technický katalog Grundfos: Hřídelové ucpávky*. 2019. Dostupné také z: [http://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove\\_ucpavky.pdf](http://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove_ucpavky.pdf)
- [32] Back to Basics: Mechanical Seals. *Pumps and systems* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.pumpsandsystems.com/mechanical-seals/september-2016-back-basics-mechanical-seals>
- [33] Centrifugal pump minimum flow bypass line. *Crane engineering* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://blog.craneengineering.net/what-is-a-centrifugal-pump-minimum-flow-bypass-line>
- [34] JANALÍK, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. Ostrava, 2008.
- [35] KABRHEL, Michal. Modelování termohydraulických jevů: *Hydraulika potrubní sítě*. (přednáška) Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2009.
- [36] STRNAD, Radek. Pohony čerpadel s měniči frekvence v praxi. *Automa*. 2010, 53-55. Dostupné také z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/42322.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42322.pdf)
- [37] 2-cestný regulační ventil 2FGB.B s tlakově vyváženou kuželkou. *Hydronic* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.hydronic.cz/2-cestny-regulacni-ventil-2fgb-b-s-tlakove-vyvazenu-kuzelkou/>
- [38] Lodní šroub poškozený kavitací. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace#/media/File:Cavitation\\_Propeller\\_Damage.JPG](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace#/media/File:Cavitation_Propeller_Damage.JPG)
- [39] VALENTA, Vladimír. Vytápění. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/2607-co-znamenava-velicina-npsh-pro-obehova-čerpadla>

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK

$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Průtok
$E$	[J/kg]	Měrná energie
$p_1$	[Pa]	Tlak v bodě 1
$p_2$	[Pa]	Tlak v bodě 2
$c_1$	[m/s]	Rychlost v bodě 1
$c_2$	[m/s]	Rychlost v bodě 2
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$y$	[h]	Rozdíl výšek
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota kapaliny
$n_1$	[s <sup>-1</sup> ]	Původní otáčky
$n_2$	[s <sup>-1</sup> ]	Konečné otáčky
$Q_1$	[m <sup>3</sup> /s]	Průtok pro $n_1$
$Q_2$	[m <sup>3</sup> /s]	Průtok pro $n_2$
$H_1$	[m]	Dopravní výška pro $n_1$
$H_2$	[m]	Dopravní výška pro $n_2$
$P_1$	[kW]	Příkon pro $n_1$
$P_2$	[kW]	Příkon pro $n_2$
$m$	[kg/hod]	Spotřeba páry motoru
$p_v$	[MPa]	Vstupní tlak do motoru
$p_{vč}$	[MPa]	Výstupní tlak z čerpadla
$p_z$	[MPa]	Tlaková rezerva na pokrytí
$Q_{\check{c}}$	[m <sup>3</sup> /s]	Průtok vybraného čerpadla
$P$	[kW]	Výkon motoru